中華農業氣象(Chinese J. Agromet.) 6(3):119-128, 1999

研究報告(Original Paper)

人工雨滴衝擊力量測系統之研究

姚銘輝[1] 盧虎生[2] 朱鈞[2] 蔡金川[1]

1. 農業試驗所農工系 2.台灣大學農藝系教授

摘 要

臺灣各地之降雨強度差異甚大，降雨強度對作物的生產與品質是一項重要的環境因子。本研究目的爲建立一套量測模擬雨滴對作物植株衝擊力的系統。由蠕動幫浦產生固定粒徑爲2 ~ 5公厘之雨滴，經由影像拍攝及軟體分析等步驟，探討雨滴分別由30，60，90和180公分高度下降至裝設壓克力板之負荷簧，以測定雨滴之衝擊力。同時由水試紙分析雨滴粒徑分佈頻率和數目。本系統亦可分析雨滴粒徑和下降高度影響壓克力板上小水滴濺起之數目、彈起高度、質量、角度和動能總和。此量測系統之建立以期能提供農業相關研究參考。

關鍵詞：動能、雨滴衝擊力、影像系統、終端速度

Studies on the Measurement System for Artificial Rain Drop Impact Force

Yao Ming-Hwi [1], Lur Huu-Shen [2], Chu Chun [2] and Tsai Jin-Chuan [1] ([1] Department of Agricultural Engineering, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan ROC; [2] Department of Agronomy, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, ROC)

Abstract : The rainfall intensity has a wide variation in Taiwan . Rainfall intensity is one of the important factors affecting crop production. To evaluate the impact force of rain drop intensity on crop tissues ， a drop-generating and videographic system was developed to study the process of drop impact force on the acrylic plate of a loadcell. Uniform water drops of 2 to 5 mm in diameter were produced using a drop generator with a peristaltic pump. Drops were released from heights of 30, 60, 90 and 180 cm above the acrylic plate, then the impact and splash processes were recorded by high resolution video camera. Splash droplets were also collected on water sensitive paper. Specialized computer software was used to analyze size, number, position, and velocity of incident drops and splash droplets. The system will be a useful tool for agricultural research.

Key word : Kinetic energy, Drop impact force, Videograghic system, Terminal velocity

前 言

臺灣主要農業生產區之年降雨量約在1500 ~ 2000公厘間，降雨多集中在夏季(5 ~ 10月)，此段時間雨量佔全年80 %以上，由於夏季爲農作物生產季節，雨量過度集中易造成災害。依據農林廳資料指出，由降雨所造成農業損失爲所有農業氣象災害的首位(農業年報, 1997)。

收到稿件(Received)： 30 Jun. 1999. 接受刊登(Accepted)： 20 Dec. 1999.

本研究中水試紙雨滴特性之量測承農業試驗所農工系邱相文先生之協助，謹誌謝忱。

我國對過多降雨所引起之淹水研究甚多 (吳等, 1994 ; Wang and Chu, 1996, 1997)，並且包括多種農作物及園藝作物 (李等, 1992 ; 陳等, 1992 ; 許等, 1997)，因此，淹水問題在我國農業研究上是相當廣泛。但降雨過程雨滴對葉片拍打及淋洗的相關文獻甚少。依目前常造成夏季菜價上揚之葉菜類蔬菜生產而言，便利的排水設施已使淹水問題不是生產限制的主因，惟蔬菜受害主要是因雨滴衝擊力對葉片拍打所致。然而，對於雨滴衝擊力的研究上，降雨設施的設計及雨滴衝擊力的量測是進行相關試驗的關鍵。

關於雨滴衝擊力的研究多以雨滴對土壤沖蝕 (Al-Durrah and Bradford, 1982 ; Sharma and Gupta, 1989) 及病菌傳播 (Yang et al., 1992 ; Reynold et al., 1987a) 等方面為主。至於雨滴衝擊力對葉片傷害的研究尚未有相關文獻。理論上天然降雨之雨滴在下降過程已達終端速度 (Terminal velocity)，若能得知雨滴粒徑即可估算其衝擊力。但實際在進行模擬降雨試驗時，受限於雨滴自由落體達到終端速度所需高度約十公尺，因此需建立高塔才能符合實際降雨條件，此項試驗難度常限制這類研究的進展。若以幫浦增加雨滴之初速度雖可達到終端速度，但由於噴頭所產生之雨滴分佈並不均勻，難以確認每一滴雨滴是否已達終端速度。因此本研究擬以負荷囊 (Load cell) 測量雨滴之衝擊力，配合影像系統及水試紙 (water sensitivity paper) 的使用，建立雨滴未達終端速度時衝擊力的量測方法，以作為未來探討雨滴衝擊力對作物影響之基礎。

材料與方法

雨滴量測系統之建立

雨滴產生及影像系統的建立如圖 1。各種不同雨滴粒徑是由可控速之蠕動幫浦 (MP-3, Tokyo Rikakikai , Japan) 經齒輪轉動輸送，由不同管徑之矽膠管可產生所需粒徑之雨滴，相同管徑所產生之雨滴具有極

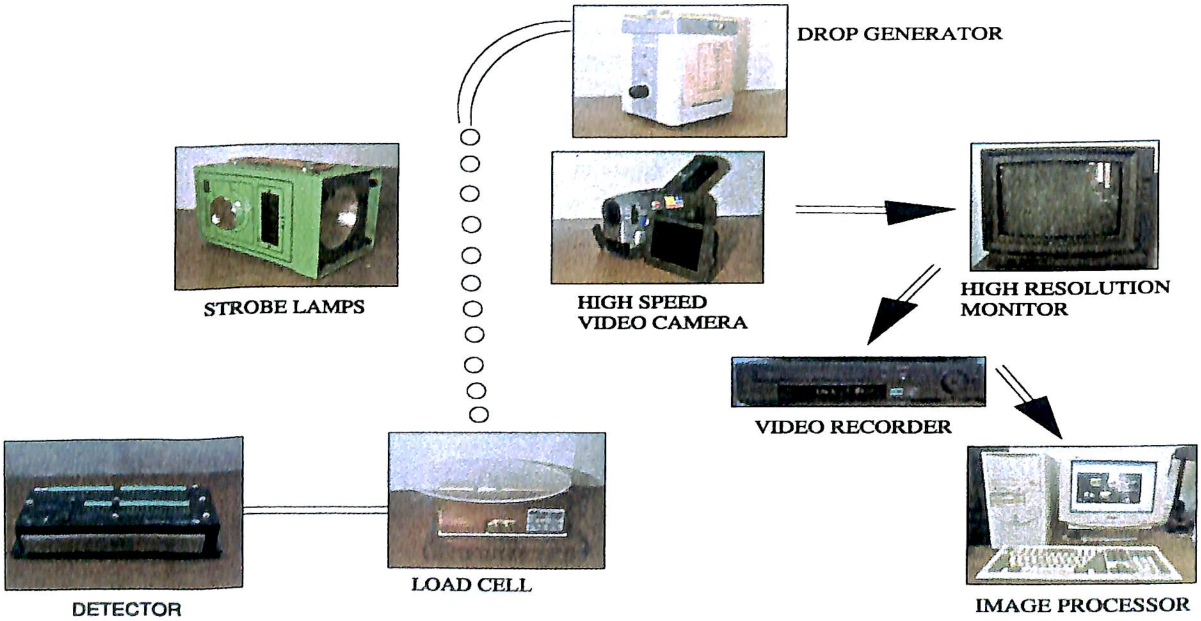

Fig. 1. Functional diagram of the drop-generating and videographic system used to study drop impact and splash dispersal.

高一致性。

雨滴降落過程以影像系統拍攝，該系統包括頻閃器（Stroboscope）(HD-300, Nissin, Japan）具3段光量自動變換，閃光範圍為100-30000 rpm ；攝錄機（video camera recorder）(CCD-TRV81, Hitachi, Japan）拍攝雨滴下降過程，將影像傳至錄放影機（VCR S-306, Mitsubishi, Japan），此型機種在播放過程每一畫面為1/30 秒，由播放畫面次數即可計算雨滴下降速度。雨滴影像在顯示器播放時可和電腦連線，凍結所需畫面由分析軟體（PC-METER, Ver3. OAmind, U.S.A）計算雨滴粒徑，面積及角度。

雨滴衝擊力之計算可由影像所得資料求得理論值，但此種方式僅限於單粒雨滴，若針對天然降雨或灑水噴頭等面狀雨滴衝擊力估算即不合適。因此，本研究嘗試利用負荷器（Load cell）(LVS-XGA, Kyowa, Japan）作為測量衝擊力的感測器。在負荷器量測桿加上直徑10公分之壓克力板，作為承受雨滴之面板。雨滴拍打在面板時，負荷器將所受衝擊力以電壓方式輸出，輸出訊號接入資料收集器（Data logger）(CR-10X, Campbell, USA）能連續及長時間記錄雨滴衝擊力（圖1）。

關於雨滴粒徑的量測除影像分析外，面狀噴雨狀態則以水試紙（Water sensitive paper）(52 × 76 mm, Spraying Systems Co. USA）測定。水試紙之雨滴粒徑量測是以水試紙經掃描器數位化後，利用Ad Oculos影像分析軟體之處理技術將雨滴影像二值化，背景灰度值為255（白色），雨滴影像灰度值為0（黑色），經過運算後可以得到每個雨滴所佔的影像素點數。所以雨滴粒徑可用下式來計算（邱, 1997）：

$$D=2\,(\text{雨滴影像所佔像素點數}/\pi)^{0.5} * \eta \quad \text{.......(1)}$$

其中D為雨滴粒徑，單位 μm ； η 為影像換算值，本研究採用42.36 。

當水滴滴在濾紙時，將使濾紙變成一個永久的圓形痕跡，由量測濾紙上不同粒徑及痕跡數目可判斷降雨事件中雨滴粒徑及數目。Fournier d'Albe 和Hidaytulla (1955) 指出污點半徑為撞擊速度的函數，並且指出水滴粒徑與痕跡大小之關係為：

$$D=aQ^{b} \quad \text{.......(2)}$$

其中D= 水滴粒徑

a= 依濾紙性質而變之常數

Q= 痕跡直徑

b= 常數

范和張 (1991) 分析水滴粒徑與染色濾紙痕跡面積之關係，得到結果為：

$$D=2.11A^{0.378} \quad \text{.......(3)}$$

其中　A= 痕跡面積 (cm^2)

若將此結果經過因次分析將痕跡面積轉換成粒徑，則b值將為0.378 ×2 =0.756 ，此值和Fournier d'Albe and Hidayetulla (1955) 歸納所得的結果b=0.75十分接近，故在本研究中沿用范和張 (1991) 的公式計算。

雨滴物理特性—公式探討

單位時間t雨滴下降速度 (Vt) 之理論值 (Reynold et al., 1987b)：

$$Vt=V_T\,(1-e^{-t/\tau}) \quad \text{.......(4)}$$

其中 V_T 為理論終瑞速度 ($cm.s^{-1}$)，t為時間 (sec)， τ 為延滯時間 (relaxation time, sec)。

理論終端速度 (V_T) 之計算依Beard (1976)：

$$V_T=880.0\{1-\exp[-(\{d+0.115\}/1.718)^{1.336}]\} \quad \text{.......(5)}$$

其中d 爲雨滴粒徑 (mm)

延滯時間τ 之計算依 Pruppacher and Klett (1980)：

$$\tau = 0.2733+0.1153 \log(d) \quad (6)$$

雨滴終端速度在本研究中極爲重要，雨滴下降過程由於重力加速度，它會越降落越快。但此時，空氣對它的阻力也越來越大，除受重力及阻力外，還有空氣浮力，因此終端速度的估算很複雜，一般是以經驗公式計算。除上述 Beard (1976) 的經驗式外，尙有兩種方式以粒徑估算終端速度之經驗式，$V_T=3.05+2.32d-0.223d^2$ (Epema and Riezebos, 1983) 及$V_T=9.5[1-\exp(d/1.77)^{1.147}]$ (Assouline and Mualem, 1989)，三種公式所得到之終端速度結果將於後述討論。

在本研究主要探討人工模擬雨滴在未達終端速度時所產生之力量，所用負荷囊雖可測定固體所產生之力 (force ；單位爲牛頓)，但如雨滴此種具有黏滯性之液體，在測定上有其限制性，並且在無法測定其最高衝擊力下 (此部份在 "結果與討論" 述及)，擬以雨滴碰觸壓克力板前瞬間之動能 (kinetic energy, 1/2 mv^2) 爲理論衝擊力，求得動能及負荷囊電壓輸出值之關係。動能的計算是依據Sharma 和 Gupta (1989) 所提公式，雨滴在某高度之動能，是該高度雨滴速度除以終端速度之比值。

$$KE^*=(1/2mVh^2)/(1/2mV_T^2)=Vh^2/V_T^2 \quad (7)$$

其中 KE* 爲某高度之相對動能 (relative kinetic energy)，m 爲雨量質量 (kg)，Vh 爲未達終端速度之某高度雨滴下降速度 ($kg.m^{-1}$)。

而 $$Vh=[\{mg/\beta\}\{1-\exp(-2h\ \beta/m)\}]^{1/2} \quad (8)$$

其中β爲磨擦係數($kg\ m^{-1}$)，h 爲高度(m)。

$$V_T=(mg/\beta)^{1/2} \quad (9)$$

經(7)(8)(9)式加以整理可得：

$$KE^*=1-\exp(-2hg/V_T^2) \quad (10)$$

其中g 爲重力加速度，9.8 $m.s^{-2}$ 。

本研究擬分別以30 ，60 ，90 及 180 公分的高度，由蠕動幫浦產生大小均一之單粒雨滴，在地面裝設負荷囊以測定雨滴衝擊力，同時配合影像系統，在雨滴下降過程量測粒徑及移動距離，以計算出理論衝擊力(指相對動能)，並由負荷囊之實測值與影像系統之估算値求出相關性。至於多粒系統則由滴水噴頭在固定水壓下產生，由水試紙測定面狀之雨滴粒徑大小及分佈情形，計算多粒雨滴之理論衝擊力，同樣以負荷囊測定實際產生之衝擊力，再求兩者之關係性，以其建立未達終端速度之雨滴衝擊力系統。

結果與討論

圖 2 爲本試驗依據 Reynold et al., (1987b) 所列公式，計算不同雨滴粒徑到達於理論終端速度的時間，雨滴粒徑越小，則浮力作用大於重力作用，所能達到的終端速度較低，隨雨滴質量增加，終端速度越高。雨滴粒徑2.0 公厘時約爲6 公尺/秒時，3 到5 公厘粒徑之雨滴則相當接近，其終端速度介於7 到9 公尺/秒之間。由於粒徑過小之雨滴對葉片衝擊力有限，因此，本研究範圍主要針對2 到5 公厘粒徑之雨滴，至於粒徑大於5 公厘在天然降雨事件中並不常見，不在此研究中探討。另由圖2 資料也可得知，不同粒徑之雨滴在1 秒內即可達到理論終端速度，意即5 公厘雨滴要達到終端速度需由9 公尺高度以自由落體方式落下。由於雨滴下降過程受多種因素影響，包括溫度、濕度及風速等，因此

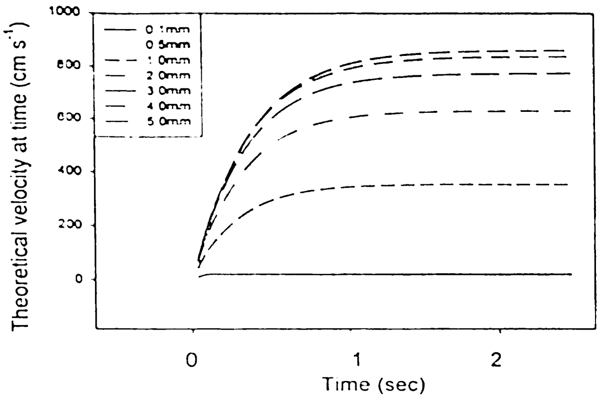

Fig. 2. Theoretical velocity of different rain drop range calculated with Reynold et al., (1987) formula.

有不同經驗公式計算終端速度。圖3爲比較三種經驗公式的結果，Beard (1976) 和 Assouline and Mualem (1989) 的公式大致相同，僅當粒徑大於3 公厘時，兩者估算有些微不同，Epema and Riezebos (1983) 在3公厘以上和Assouline and Mualem (1989) 相同，但在粒徑較小之雨滴則較其他二種公式相較有高估現象。由於雨滴粒徑大於2公厘之終端速度由三種公式計算差異並不大，因此在本研究中是以Beard (1976) 的經驗公式爲估計理論終端速度的基準。

雨滴衝擊力是以動能 ($1/2\ mv^2$) 表示，雨滴下降速度的精確量測是估算動能的基礎。以往雨滴下降速度的量測大多以照相曝光方式 (Reynolds et al., 1987a) 或利用紅外線感應器，感應水滴通過時所反射的紅外線信號 (范和張 1991)。Yang 等 (1991) 利用攝影機可連續拍攝雨滴降落影像，若在拍攝過程放置尺規，則於影像中可清楚計算不同時間中雨滴下降距離。表1爲由影像系統所計算本試驗系統之雨滴下降速度和理論值作比較，理論值是依據Reynold et al (1987) 所推導之公式所計算。由於下降距離及時間皆可由影像系統作精確量測，因此，本試驗中之實測值和理論值間具有很高一致性。

如何量測雨滴之實際衝擊力？Palmer (1965) 以應變規 (Strain gage) 測量三種雨滴

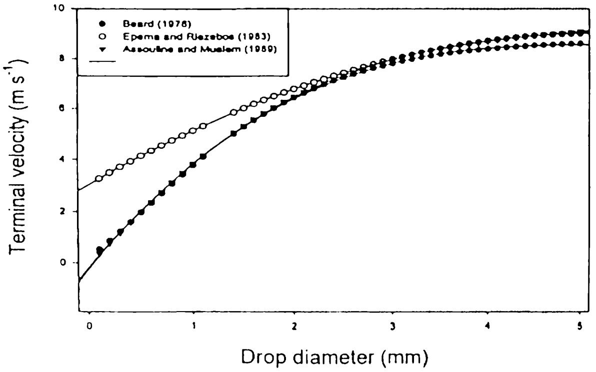

Fig. 3. Simulated relationship of the terminal velocity and diameter of rain drop with three models.

Table 1. Attributes of the incident drops released from different heights.

Distance (cm)	Drop diameter (mm)	impact velocity ($cm \cdot s^{-1}$) Observed	Theoretical
30	2.41	230.18 (± 15.3)	235.68
	3.28	322.00 (± 10.7)	324.11
	4.28	396.43 (± 18.5)	386.23
	5.21	501.21 (± 11.3)	504.77
60	2.41	221.21 (± 18.2)	237.11
	3.28	327.48 (± 9.6)	328.00
	4.28	406.53 (± 20.3)	393.08
	5.21	528.61 (± 13.1)	521.85
90	2.41	232.41 (± 10.0)	237.68
	3.28	341.25 (± 17.8)	329.55
	4.28	410.17 (± 14.3)	395.82
	5.21	543.11 (± 23.1)	528.83
180	2.41	231.43 (± 8.8)	237.86
	3.28	340.59 (± 15.6)	330.05
	4.28	410.03 (± 17.8)	396.70
	5.21	544.89 (± 12.6)	531.10

1. Listed are means over 20 replicates for each release height and drop size.
2. Terminal velocity were computed using the theoretical equations in Reynold et al. (1987).
3. Standard deviations are expressed in parentheses.

粒徑降落在0到3公分深之水面的衝擊力，三種粒徑雨滴隨雨滴質量和衝擊力呈線性增加。Imeson et al., (1981) 利用5公分大小及1公厘厚度之壓電晶體 (Piezoelectric crystal) 測定電壓輸出值，發現該輸出值與雨滴衝擊力呈線性關係 (r^2=0.985)。而本研究中所使用之負荷囊 (Load cell) 是未被利用在雨滴衝擊力量測上之器具，由於負荷囊爲天枰元件，取得容易並且己經精密校正。雨滴下降速度極快，以5.21公厘粒徑下降180公分所需時間約爲0.3秒，而雨滴拍打在量測元件所產生之最高衝擊力更快，根據Nearing et al., (1986) 指出最高衝擊力發生在3 μs 之前，粒徑大的雨滴有較長衝擊時間，3.31公厘爲7 μs，而4.51公厘則有17 μs。以目前電腦及資料收集器 (data logger) 基本時間單位爲秒，要量測最高衝擊力實有困難，因此本研究中是先由雨滴直接滴在負荷囊之壓克力板上，測得雨滴重量所產生之電壓值，再由不同下降距離量測衝擊力大小，每一單粒雨滴重覆20次測定並取平均值，以求得不同粒徑雨滴之衝擊力大小。

在單粒雨滴量測上，上述影像系統可提供雨滴粒徑和下降速度，動能即可求出。表2爲粒徑分別爲2.41，3.28，4.28及5.21公厘之雨滴由30，60，90及180公分下降距離所產生動能，由影像系統所求之理論值和負荷囊之電壓輸出值所得到結果作比較。表中顯示負荷囊電壓值因雨滴下降距離增加而提高，兩者呈顯著相關性 (2.41公厘雨滴粒徑時 R^2=0.94；3.28公厘雨滴粒徑時 R^2=0.98；4.28公厘雨滴粒徑時 R^2=0.95；5.21公厘雨滴粒徑時 R^2=0.94)，此結果顯示由電壓輸出值可推估雨滴的衝擊力。

由於負荷囊主要是作荷重功能，所承載物體是非黏滯性及不可壓縮，但雨滴降落在固體表面是可壓縮之流體，雨滴和固

Table 2. The relationship between the voltage output value of load cell and theoretical kinetic energy.

Distance (cm	Drop diamete (mm)	Observed voltage (μV)	Theoretical kinetic energy (μJ)
30	2.41	90 (± 11.8)	1.61
	3.28	102 (± 27.4)	1.79
	4.28	104 (± 21.7)	1.97
	5.21	107 (± 19.9)	1.98
60	2.41	183 (± 22.4)	9.56
	3.28	219 (± 27.6)	9.88
	4.28	246 (± 17.8)	10.70
	5.21	294 (± 23.1)	11.45
90	2.41	336 (± 19.0)	32.19
	3.28	386 (± 31.5)	33.85
	4.28	507 (± 57.0)	34.46
	5.21	622 (± 47.2)	38.06
180	2.41	450 (± 57.8)	92.80
	3.28	508 (± 44.5)	103.25
	4.28	613 (± 43.1)	109.00
	5.21	650 (± 39.6)	109.71

1. Listed are means over 20 replicates for each release height and drop size.
2. Kinetic energy was computed using the theoretical equations in Sharma and Gupta (1989).
3. Standard deviations are expressed in parentheses.

體表面接觸後會產生壓力波 (Nearing, 1986)。利用負荷囊在衝擊力量測時需經校正工作。因此影像系統即以單粒雨滴進行負荷囊的校正工作。但不論是天然降雨或是利用噴頭模擬降雨是不可能由影像系統作逐粒作分析，因此多粒雨滴系統的建立有二項問題需探討，一爲在降雨事件中如何記錄雨滴粒徑？二爲多粒雨滴拍打在負荷囊量測桿上之壓克力板，經拍打濺出之小雨滴其衝擊力如何量測？

一般在雨滴粒徑量測上常用遇水呈顏色變化之濾紙，然而水滴粒徑與痕跡大小關係中之a值 (公式2) 則因所用濾紙材質而有所不同，以往研究者是以不同染料塗抹

在濾紙上，塗抹均勻度及厚度上的差異常有不同結果。本研究所用之材料爲已商品化之水試紙，此黃色試驗紙遇水則呈藍色痕跡。由於此種水試紙廣泛運用在噴霧機所產生霧粒分析的研究上，因此不同試驗處理間可相互比較，而避免因不同研究者所製作濾紙過程或染料差異而使結果無法相互比較。表3爲利用影像拍攝之雨滴粒徑，在不同高度 (0 、 30 及 180 公分) 所得到之a 值，根據范和張 (1991) 公式，痕跡面積爲實際粒徑(影像分析結果)的函數，因此，不同粒徑下在0 公分高度 (實際是雨滴離開雨滴產生器即以水試紙測定) 則a 值大致是相一致，此結果說明水試紙結果可反映實際雨滴粒徑，隨雨滴下降距離增加所產生之衝擊力，使得污點擴散而增加面積，a 值則相對變小，不過，雨滴粒徑越小則擴散情形越大，a 值相對減少，此可能與不同雨滴在水試紙之延滯時間有關。雨滴拍打在乾燥壓克力板時，因雨滴本身黏滯力並不會有小水滴濺出，但當連續降雨在板上形成水膜時，則會有水滴濺起並降落，因此整個衝擊力是包括由雨滴產生器所下降之雨滴及壓克力板濺起水滴的總和。表4爲壓克力板形成水膜時，不同粒徑雨滴在180公分處降落所濺起水滴情形，資料所得是由攝影機拍攝水滴濺起影像，由分析軟體計算粒徑及數目。水滴粒徑分爲四種等級 (≦1 ，1-2 ，2-3 ，≧3 mm)，彈起高度、水滴質量及動能總合也分別計算。結果顯示雨滴粒徑較小則濺起水滴大多集中在≦1 或1-2 mm 等較小粒徑範圍，隨雨滴粒徑增加所產生衝擊力加

Table 3. Coefficients of water sensitivity paper analysis for drop diameter measurement.

Drop diameter	Falling distance (cm) 180	30	0
5.21	4.31 ± 0.09	4.43 ± 0.06	5.39 ± 0.03
4.28	3.93 ± 0.16	4.35 ± 0.12	5.46 ± 0.07
3.28	3.85 ± 0.08	4.01 ± 0.07	5.37 ± 0.04
2.41	3.69 ± 0.06	3.84 ± 0.09	5.46 ± 0.04

Table 4. Droplet responses in relation to incident drop attributes.

Incident Drop Diameter(mm)	Splash droplets Diameter (mm)	Number (No.)	Travel distance (mm)	Total droplet mass(mg)	Total kinetic energy(mJ)
2.41	≦1	5.7(±1.3)	21(±3.1)	0.022(±0.004)	0.016(±0.003)
	1-2	2.2(±1.1)	35(±6.7)	1.021(±0.010)	0.005(±0.002)
	2-3	0	--	--	--
	≧3	0	--	--	--
3.28	≦1	7.3(±2.3)	23(±4.7)	0.024(±0.007)	0.022(±0.004)
	1-2	8.2(±1.7)	42(±6.8)	1.403(±0.008)	0.020(±0.004)
	2-3	1.7(±0.8)	73(±3.1)	8.166(±0.031)	0.003(±0.001)
	≧3	1.0(±0.8)	28(±2.7)	20.540(±3.153)	0.001(±0.000)
4.28	≦1	6.9(±1.6)	31(±5.5)	0.039(±0.010)	0.026(±0.008)
	1-2	11.4(±2.1)	56(±8.7)	1.528(±0.087)	0.036(±0.008)
	2-3	1.5(±0.6)	73(±6.7)	9.616(±1.234)	0.004(±0.001)
	≧3	2.0(±0.8)	43(±6.7)	24.382(±5.174)	0.002(±0.001)
5.21	≦1	5.3(±1.3)	28(±4.5)	0.033(±0.009)	0.019(±0.003)
	1-2	10.8(±2.0)	46(±7.8)	1.835(±0.075)	0.026(±0.005)
	2-3	4.5(±1.5)	84(±8.1)	10.286(±1.016)	0.013(±0.003)
	≧3	3.1(±1.2)	67(±3.0)	33.446(±3.142)	0.005(±0.002)

大，大型水滴出現頻度增加，同時質量及動能也隨之增加。濺起水滴之角度也和本身質量有關，粒徑 1.5-2.5 mm 之水滴大多以45 度斜角噴出，較大或較小粒徑水滴以低角度或垂直方向彈出 (圖4)。

本試驗以單粒雨滴探討水試紙和影像

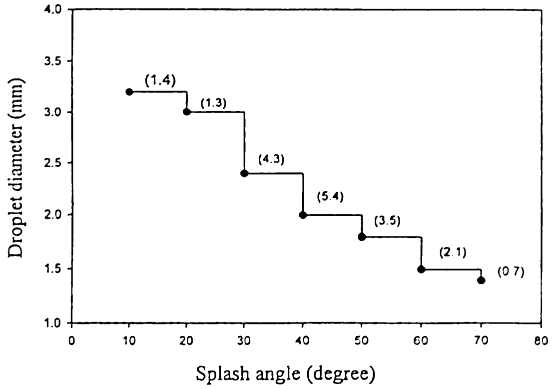

Fig. 4. Relation between droplet diameter and impact angle with incident drop of 3.28 mm. Number of droplet per test is showed in parentheses.

的結果，可運用在多粒雨滴系統將降雨處理後之水試紙經掃瞄器轉爲影像檔，再利用影像分析軟體 (本研究是以Ad Oculos ver 3.0) 分析水試紙上雨滴數目及粒徑大小，分析流程及轉換公式已有相關文獻參考 (邱，1997)。經計算可得水試紙之雨滴數目及粒徑，水試紙取樣是由固定降落高度；因此，由雨滴數目、粒徑及降落距離可求得動量，再經換算爲壓克力板面積即可和負荷囊產生之電壓值求相關性。

圖4 爲以降雨噴頭模擬雨強及在 180 公分下置負荷囊所測得電壓值之關係，兩者相關係數高達 0.99 。圖 5 爲由水試紙取得降雨時水平面之雨滴粒徑及數目，計算其產生動能，並經換算爲壓克力板面積，同時將壓克力板上水膜產生小水滴之數目及衝擊力一併加入計算，兩者相關係數爲 0.91 ，此係數較低原因，主要是水試紙取

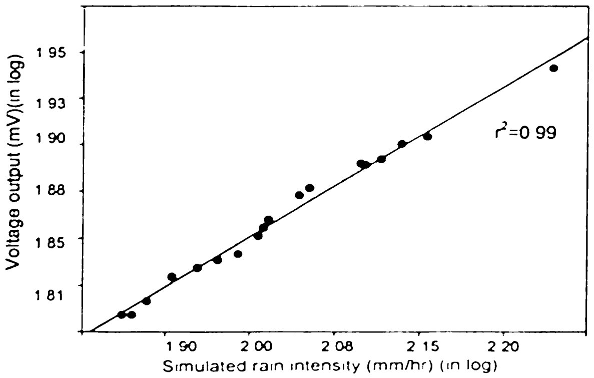

Fig. 5. The relationship between rain intensity and the voltage output from load cell.

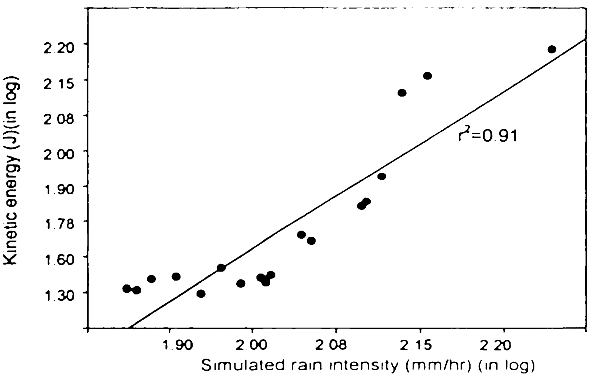

Fig. 6. The relationship between rainfall intensity and kinetic energy of raindrop an analyzed by water sensitivity paper.

樣無法完全代表整個水平面粒徑分佈，另一爲壓克力板上小水滴產生受多種因素影響，因此在估算上會有較大變異存在。

結　　論

未來氣候變遷下 (兩倍二氧化碳濃度) 臺灣降水情形，根據童 (1997) 以大甲溪上游爲例，利用大氣環流模式 (General Circulation Model ; GCM) 所作結果，降水平均增加4 % ，其中豐水期增加 7 % ，枯水期減少3 % ，也就是降水將朝極端化發展。由於目前我國降水所引起之天然災害已相當嚴重，若未來如大氣環流模式所作之預測，則降水將成爲農業氣象災害中最

嚴重問題。因此加強降水對農作物生產研究及防災措施之研擬是刻不容緩的議題。但受限於終端速度以及量測技術的發展，關於農作物生長受雨滴衝擊力影響之研究仍處於起步階段，本研究利用價格低廉及取得容易之材料或元件建立雨滴衝擊力之量測系統，可供日後相關研究進行之參考。

引用文獻

1. 李炳和、黃世利、侯清利 1992 淹水處理對不結球白菜生育之影響。嘉義農專學報。31:29-41.
2. 吳炳奇、蔡秀隆、朱德民 1994 玉米對浸水的反應。中華農業氣象。1:151-156.
3. 邱相文 1997 影像處理技術應用於噴霧沉積之分析研究。國立中興大學農業機械工程研究所碩士論文。
4. 范正成、張宜信 1991 利用影像分析系統量測及分析雨點粒徑分佈。台灣水利季刊。39:28-40 。
5. 許玉妹、曾夢蛟、林金和 1997 蓮霧淹水後根部之酒精脫氫酵素的變化。中國園藝。43:72-80.
6. 陳駿季、陳宗禮、宋濟民 1992 淹水對大豆葉片光合代謝之影響。農林學報。41:17-26 。
7. 童慶斌 1997 氣候變遷對大甲溪上游河川流量之衝擊。臺灣水利季刊。45:64-70 。
8. 農業年報86年版 1997 臺灣省政府農林廳。
9. Al-Durrah, M.M. and J.M. Bradford. 1982. The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. Soil Sci. Soc. Am. J. 46:1086-1090.
10. Assouline, S and Y. Mualem. 1989. The similarity of regional rainfall: A dimensionless model of drop size distribution. Trans. of the ASAE 32:1216-1222.
11. Beard, K. V. 1976. Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drop aloft. J. Atmos. Sci. 33:851-864.
12. Epema, G.F. and H.Th. Riezebos. 1983. Fall velocity of water drops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. p.1-17. In J. de Ploey (ed.)，Rainfall simulation, runoff and soil erosion. Catena Supplement 4, Braunschweight.
13. Fournier d'Albe, E.M. and M.S. Hidayetulla. 1955. The breakup of large water drops falling at terminal velocity in free air. Royal Meteorol. Soc. J. 81:610-613.
14. Imeson , A. C., R. Vis and E. de Water. 1981. The measurement of water drop impact forces with a piezoelectric transducer. Catena 8:83-96.
15. Nearing, M.A., J.M. Bradford and R.D. Holtz. 1986. Measurement of force vs. time relations for water drop impact. Soil Sci. Soc. Am. J. 50:1532-1536.
16. Palmer, R. S. 1965. Water drop impact forces. Trans. of the ASAE 8:69-72
17. Pruppacher, H.R and J. D. Klett. 1980. Microphysics of Clouds and Precipitation. Reidel Publishing, London.714pp.
18. Reynold, K.M., M.A. Bulger, L.V. Madden and M.A. Ellis. 1987a. New methods using simulated rain to study the splash dispersal of plant pathogens. Phytopathology 77:921-926.
19. Reynold, K.M., L.V. Madden, D.L. Reichard and M.A. Ellis.1987b. Methods for study of raindrop impact on plant surfaces with application to predicting inoculum dispersal by rain. Phytopathology 77:226-232.
20. Sharma, P.P. and S.C. Gupta. 1989. Sand detachment by single raindrops of varying kinetic energy and momentum. Soil Sci. Soc. Am. J. 53:1005-1010.
21. Wang, C.Y. and T.M. Chu. 1996. Effects of waterlogging on the growth responses and sucrose translocation in corn (*Zea mays L.*) seedlings. Chinese J. of Agromet. 3:45-55.

22. Wang, C.Y. and T.M. Chu. 1997. Improving waterlogging tolerance of corn (*Zea may L.*) seedlings by hypoxia pretreatment. Chinese J. of Agromet. 4:111-118.

23. Yang, X., L.V. Madden., D.L. Reichard, R.D. Fox and M.A. Ellis. 1991. Motion analysis of drop impact on a strawberry surface. Agric. for. Meteorol. 56:67-92.

24. Yang, X., L.V. Madden., D.L. Reichard, L.L. Wilson and M.A. Ellis. 1992. Splash dispersal of *Colletotrichum acutatum* and *Phytophthora* cactorum from strawberry fruit by single drop impact. Phytopathology 82:332-340.